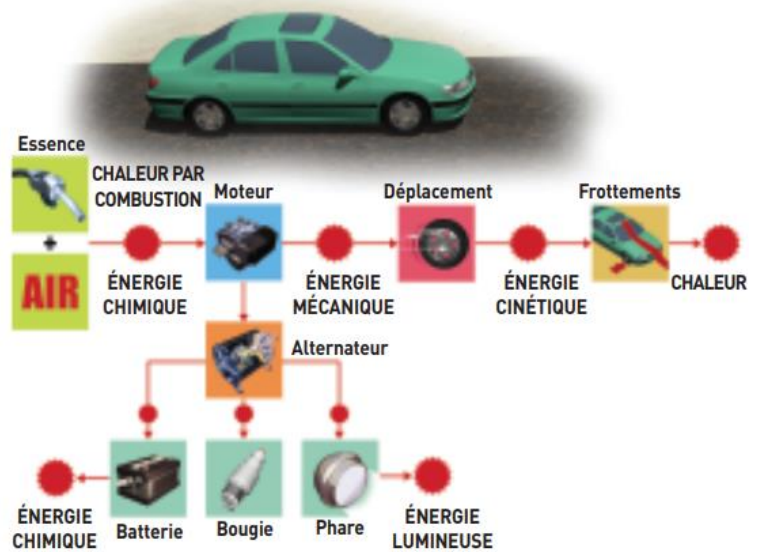


Conversion électrique de puissance

La conversion électrique est l'étude des circuits permettant de transférer une large plage de puissance du μW au GW d'un générateur à une charge.

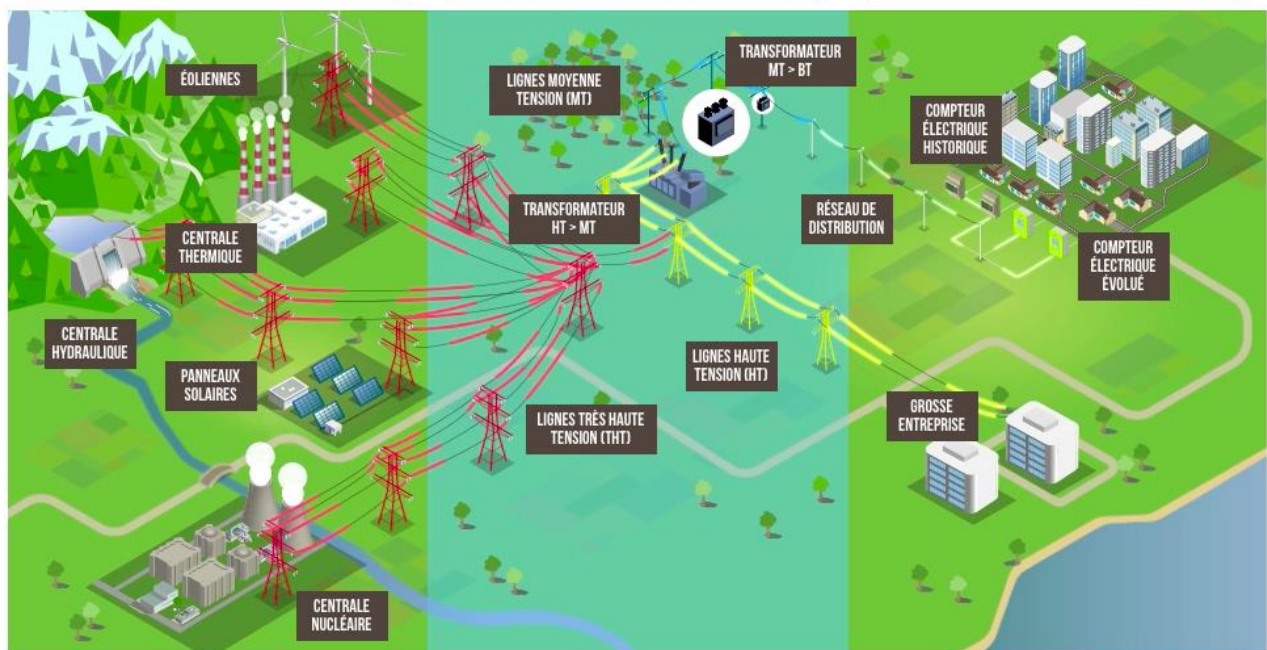
Transports terrestres et aériens
Gestion d'énergie sur les réseaux de distribution
Gestion de la production d'énergie
Applications domestiques et industrielles
Applications mobiles



> PRODUCTION

> TRANSPORT ET DISTRIBUTION

> CONSOMMATION



Centrale EDF

230V
domestique

Panneau
photovoltaïque

Source d'entrée
ou générateur

Convertisseur

Statique : transformateur
interrupteur

Electromécanique :
Machine synchrone
Machine à courant continu

Locomotive
Usine

Chargeur
de portable

Réseau
électrique

Source de sortie
ou récepteur

Conversion de puissance : Chapitre 1 Transformateur

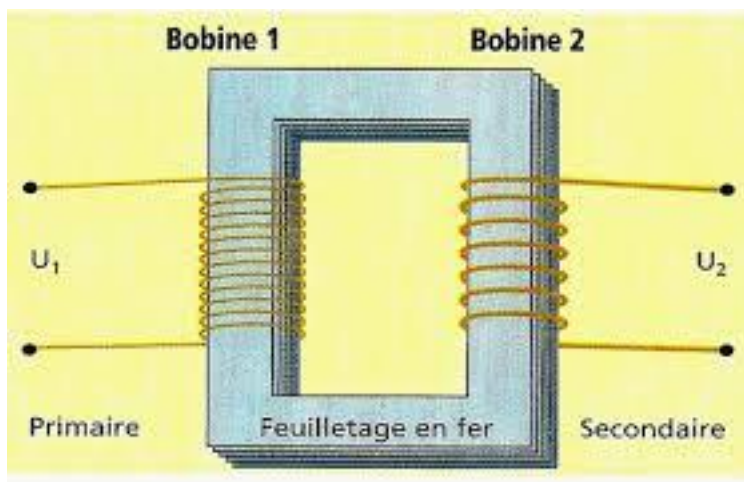
Notions et contenus	Capacités exigibles	CdE
5.1. Puissance électrique en régime sinusoïdal		
Puissance moyenne, facteur de puissance. Représentation de Fresnels.	Définir le facteur de puissance, faire le lien avec la représentation des tensions et des courants sur un diagramme de Fresnel. Citer et exploiter la relation $P = U_{eff} I_{eff} \cos \phi$.	CdE2 : 19.4 à 19.6 ; 19.8 à 19.11
Puissance moyenne absorbée par une impédance.	Citer et exploiter les relations $P = \Re_e(\underline{Z}) I_{eff}^2 = \Re_e(\underline{Y}) U_{eff}^2$. Justifier qu'un dipôle purement réactif n'absorbe aucune puissance en moyenne.	CdE2 : 19.1 ; 19.2
5.2. Transformateur		
Modèle du transformateur idéal.	Citer les hypothèses du transformateur idéal. Établir les lois de transformation des tensions et des courants du transformateur idéal, en respectant l'algébrisation associée aux bornes homologues. Relier le transfert instantané et parfait de puissance à une absence de pertes et à un stockage nul de l'énergie électromagnétique.	CdE2 : 20.1 à 20.3
Pertes.	Citer les pertes cuivre, les pertes fer par courant de Foucault et par hystérésis. Décrire des solutions permettant de réduire ces pertes.	
Applications du transformateur.	Expliquer le rôle du transformateur pour l'isolement. Établir le transfert d'impédance entre le primaire et le secondaire. Expliquer l'intérêt du transport de l'énergie électrique à haute tension afin de réduire les pertes en ligne. Expliquer l'avantage d'un facteur de puissance élevé. Mettre en œuvre un transformateur et étudier son rendement sur charge résistive.	CdE 2 : 20.4 à 20.10

2) Puissance moyenne consommée par les dipôles usuels en régime sinusoïdal

Nom du dipôle	Schéma électrique	Impédance complexe et valeur de φ_z déphasage de $u(t)$ par rapport à $i(t)$	Diagramme de Fresnel et valeur de φ déphasage de $i(t)$ par rapport à $u(t)$	Puissance moyenne consommée
Résistor				
Condensateur idéal réel				
Bobine Idéale réelle				
Interrupteur idéal				

II. Transformateur

1. Présentation

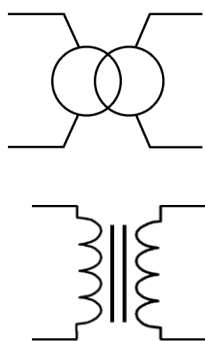


Circuit magnétique.
Il canalise le flux magnétique.
Il est constitué de tôles
ferromagnétiques isolées les unes des
autres pour réduire les pertes
ferromagnétiques.

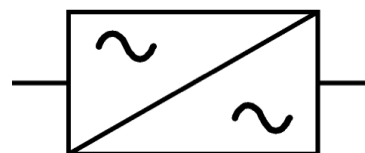
Loi de Faraday : une variation de flux magnétique à travers une spire crée une f.é.m. e . Inversement une f.é.m. e dans une spire crée une variation de flux magnétique à travers celle-ci.

$$e = - \frac{d\phi(\vec{B})}{dt}$$

Symboles



Le transformateur est un convertisseur statique (pas de pièce en mouvement). Il transforme une tension sinusoïdale en une autre tension sinusoïdale de valeur efficace différente.

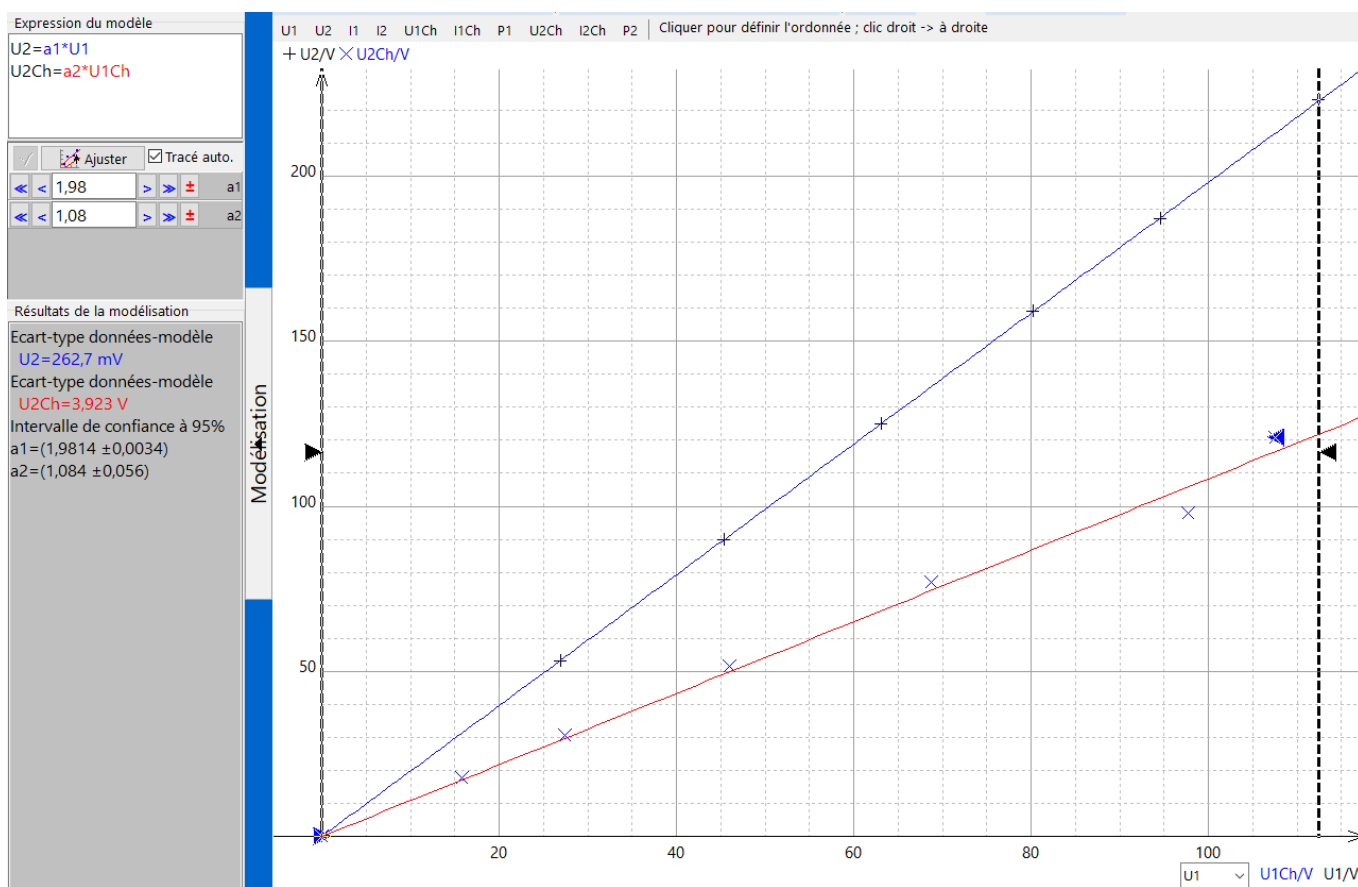


Pour la science n°487 Mai 2018

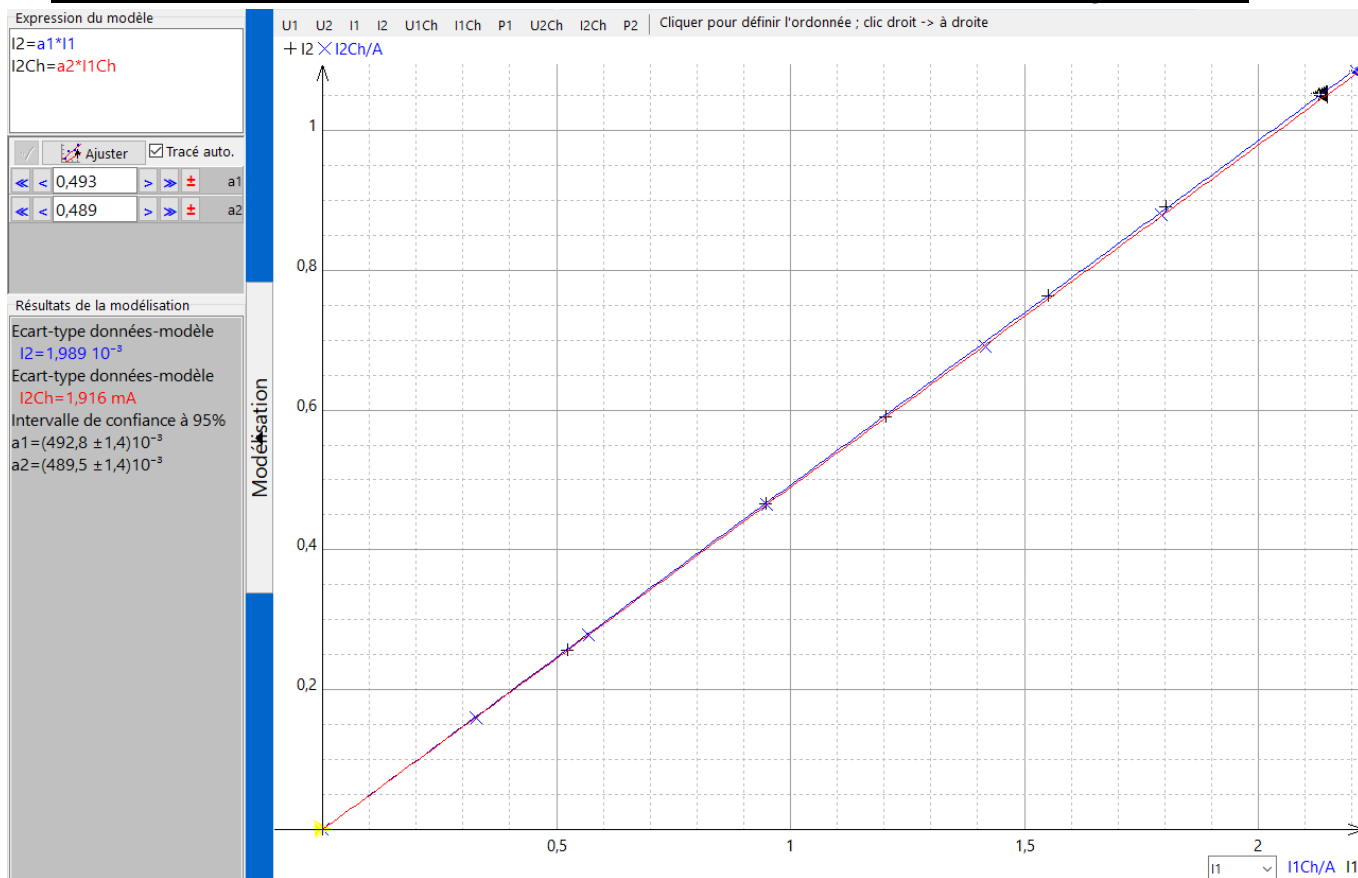
Idées de physique, Jean-Michel Courty et Edouard Kierlick Les transformations du transformateur

Au primaire $N_1 = 500$ spires, au secondaire $N_2 = 1000$ spires

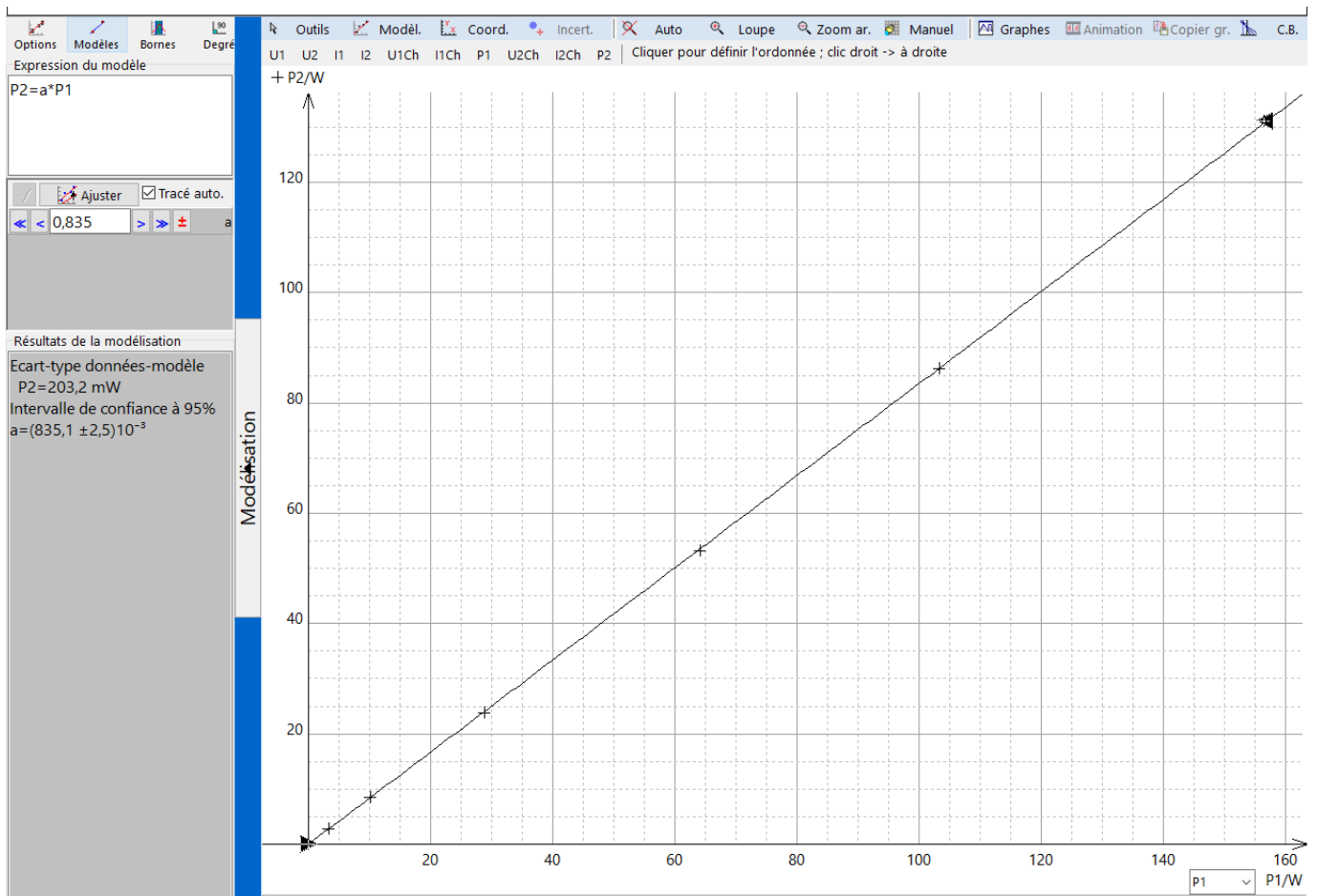
Vérification expérimentale de la loi des tensions, à vide et sur une charge de $110\ \Omega$



Vérification expérimentale de la loi des courants, en court-circuit et sur une charge de $110\ \Omega$



Rendement du transformateur sur une charge de $110\ \Omega$



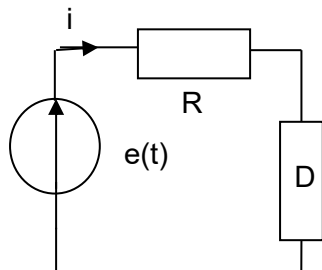
III. Applications du transformateur

1. Transformateur d'isolement

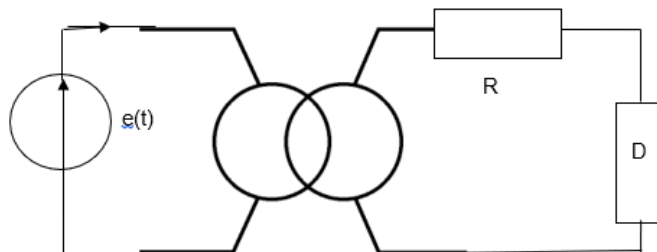
But : séparer les masses dans un circuit

Exemple : tracer la caractéristique du dipôle D à l'oscilloscope en mode XY

Problème :

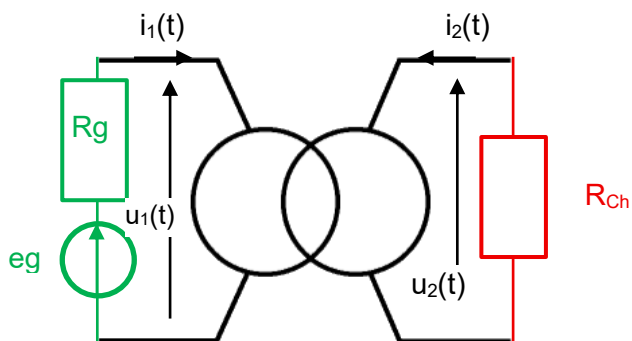


Solution :



2. Transfert d'impédance

lois du transformateur parfait



Générateur réel Transformateur parfait Impédance de charge
de rapport m

Impédance ramenée au primaire	Impédance ramenée au secondaire

Intérêt : adaptation d'impédance : la puissance reçue par la charge est maximale si la résistance de la charge est égale à la résistance du générateur. (A montrer !)

3. Transport et distribution de l'électricité

Schéma général du transport d'électricité en France

La tension en sortie d'un alternateur de centrale est de l'ordre de 20kV (HTA).

Un transformateur éleveur de tension branché directement en sortie de l'alternateur produira une tension de 400kV (THT).

L'électricité peut maintenant être transportée sur de grandes distances (lignes aériennes THT 400kV).

Les lignes THT alimentent des postes de répartition où la tension est abaissée à 225 kV (HTB) pour alimenter le réseau régional de distribution.

A partir d'un poste de distribution, la tension HTB est ensuite abaissée en une tension de type HTA afin d'être acheminée jusqu'aux postes de transformation par le réseau de distribution (Quartiers, villages, entreprises...) : 20kV ou 15kV. En fin de parcours, elle est abaissée par le poste de transformation en une tension de type BT pour être ensuite livrée aux centres de consommation domestiques : 400V.

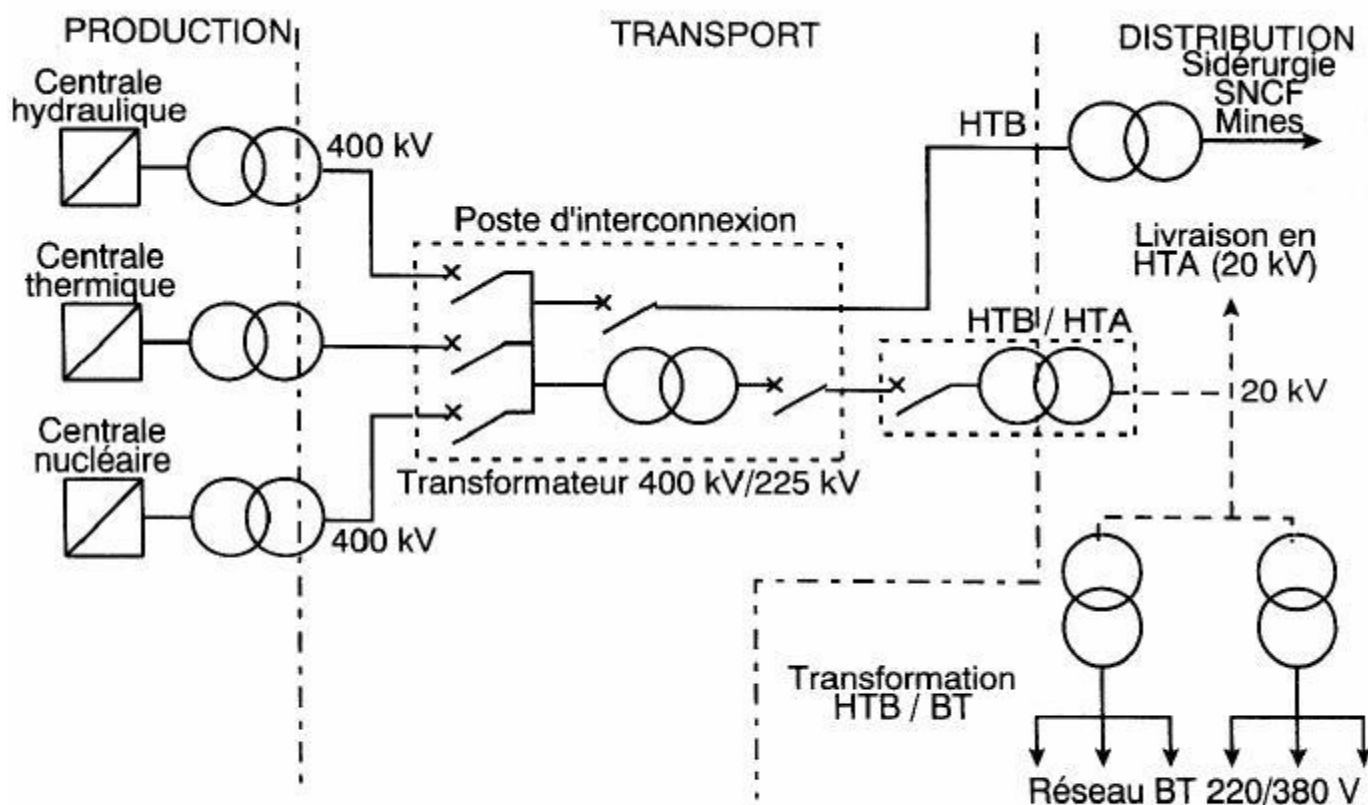


Schéma général de la production, du transport et de la distribution d'énergie électrique.

http://dev.blinckers-groups.com/BBoux/Elektron/distribution_electrique3.php



Transformateur de puissance électropolis (Mulhouse fev 2024)



Un transformateur de puissance dans un poste électrique (Wikipédia)

LE TRANSFORMATEUR

Alimenté par le circuit primaire en énergie électrique de 225 000 volts, le transformateur modifie la tension en énergie secondaire de 20 000 volts, qu'ERDF peut alors distribuer dans les différents sites de consommation de l'agglomération.

QUE SE PASSE-T-IL À L'INTÉRIEUR ?

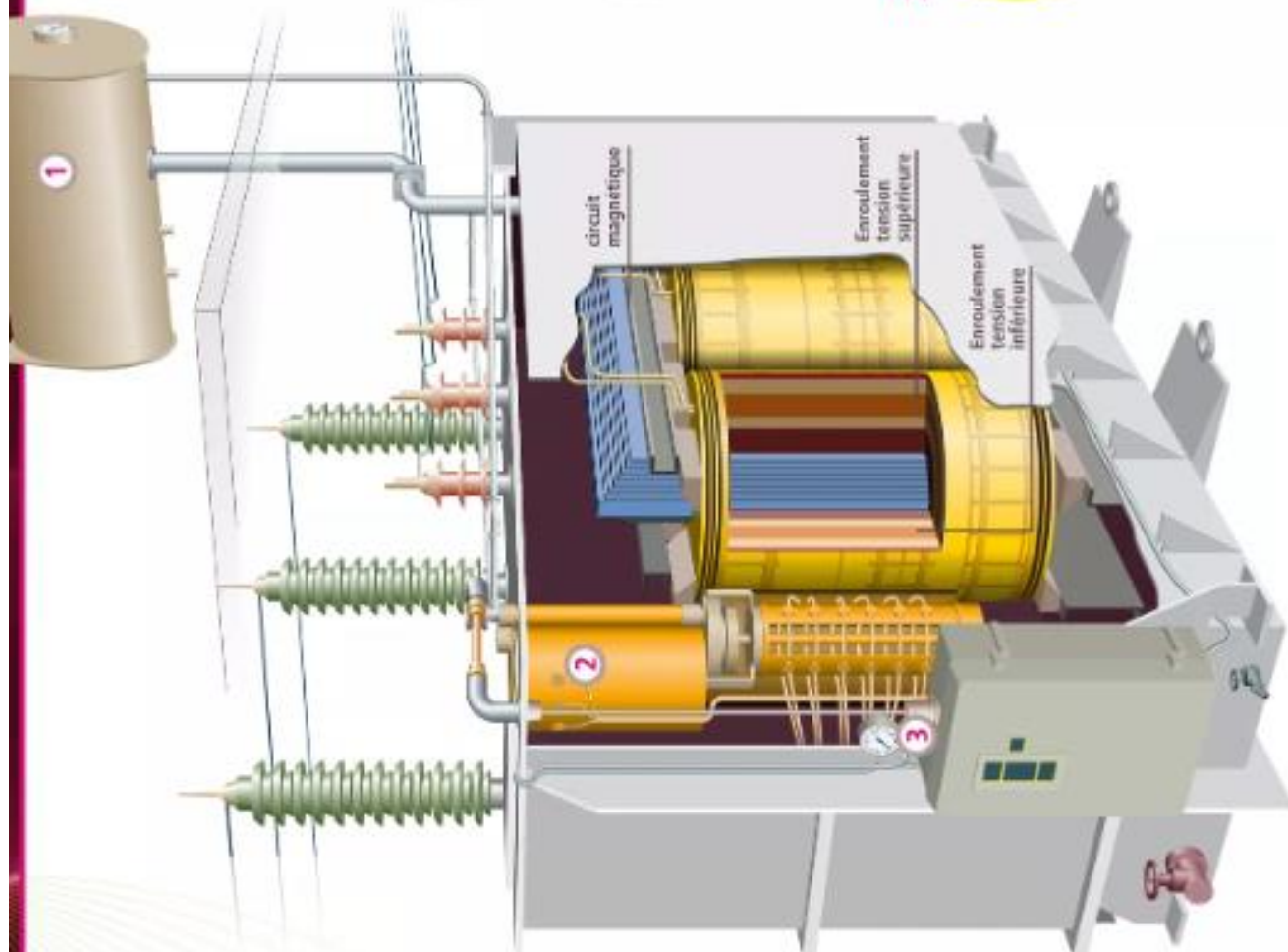
La transformation de la tension s'effectue par l'intermédiaire de deux enroulements de cuivre (enroulement primaire et secondaire) disposés de façon concentrique, destinés à échanger le flux grâce au circuit magnétique.

Le principe de fonctionnement repose sur le transfert d'énergie par induction électromagnétique : le premier enroulement (bobinage de fils de cuivre) reçoit l'énergie électrique et la transforme en énergie magnétique par induction. Le deuxième enroulement, traversé par le champ magnétique produit, fournit un courant alternatif de même fréquence mais de tension différente.

L'HUILE, INGRÉDIENT INDISPENSABLE

Le transformateur est plongé dans de l'huile. Ce liquide joue un double rôle :

- L'huile est un isolant.
- L'huile assure le refroidissement du transformateur.



1

Le réservoir d'expansion
placé au 3^e étage du poste de Co permet au niveau d'huile de varier sans impacter la pression dans le transformateur. En effet, les variations de températures de l'huile impliquent des variations de son volume. Avec une capacité de 500 litres, ce réservoir absorbe ces variations.

2

Le dispositif de réglage de la tension, assure une tension stable en sortie du transformateur.

3

Des sondes placées à l'intérieur du transformateur permettent une surveillance permanente de la température de l'huile.



LE SAVIEZ-VOUS ?

Des prélèvements sont effectués régulièrement pour contrôler la qualité de l'huile présente à l'intérieur du transformateur.

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

LES TRANSFORMATIONS DU TRANSFORMATEUR

**Comment miniaturiser les transformateurs?
En augmentant de plusieurs ordres de grandeur
la fréquence du courant électrique à convertir...**

Jusqu'où réduira-t-on la taille ou le poids des chargeurs utilisés pour recharger les batteries de nos ordinateurs portables ou de nos téléphones? Ces dispositifs comportent des transformateurs fournissant une tension électrique de quelques volts alors qu'ils sont branchés sur les 220 volts du secteur. Leur miniaturisation se heurte alors aux limites qu'imposent les phénomènes physiques sur lesquels ils sont fondés. Quels sont ces phénomènes et quelles sont ces limites?

DEUX BOBINES ET UN NOYAU DE FER

Un transformateur électrique permet de modifier l'amplitude d'un courant ou d'une tension alternative entre la source d'électricité et la « charge », c'est-à-dire l'appareil qui lui est branché et qui consomme de l'énergie électrique. Il est en général composé de deux bobines de fil de cuivre qui entourent un noyau de métal magnétique en forme de cadre ou de tore (*voir l'encadré page ci-contre*). Son fonctionnement exploite l'induction électrique, qui combine deux phénomènes

physiques: d'une part, tout courant électrique crée un champ magnétique; d'autre part, tout champ magnétique variable induit un champ électrique.

Pour mieux comprendre un tel dispositif et saisir pourquoi il est difficile à miniaturiser, imaginons pas à pas la fabrication d'un transformateur idéal.

En guise de « circuit primaire » du transformateur, formons une boucle avec du fil de résistance négligeable et appliquons à ses bornes une tension électrique continue. Bien que la résistance électrique soit nulle, l'intensité du courant ne devient pas infinie, mais démarre de zéro puis croît linéairement avec le temps. Pourquoi?

Lorsque le courant se met à circuler, apparaît autour de la boucle un champ magnétique. La variation de ce dernier crée au voisinage du fil un champ électrique proportionnel à la vitesse de variation du champ magnétique, conformément aux lois de l'induction mentionnées plus haut. Ce champ électrique s'oppose à l'établissement du courant: c'est la loi de Lenz. L'effet sur toute la boucle est alors l'apparition d'une tension induite égale et opposée à la tension appliquée.

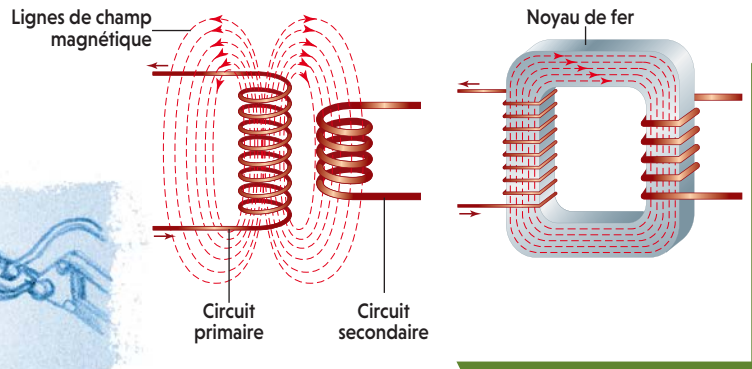


En guise de « circuit secondaire », plaçons quasiment au même endroit que la boucle primaire une boucle en circuit ouvert, où aucun courant ne circule. Puisque cette boucle secondaire subit le même champ électrique, il apparaît à ses bornes une tension égale à celle induite dans la première, donc exactement opposée à la tension du circuit primaire. Nous avons ainsi réussi à transférer une tension d'un circuit à l'autre, sans contact.

DU PRIMAIRE AU SECONDAIRE

Un transformateur électrique comporte un bobinage primaire et un bobinage secondaire. Le courant circulant dans le bobinage du circuit primaire engendre un champ magnétique concentré dans l'axe du solénoïde, mais qui atteint aussi le solénoïde du circuit secondaire. Celui-ci étant alors soumis à un champ magnétique alternatif (la tension primaire est supposée alternative), un courant alternatif y est induit. L'amplitude de la tension secondaire correspondante est égale à l'amplitude de la tension primaire multipliée par le rapport des nombres de spires des deux solénoïdes. Ici, le transformateur réduit donc la tension.

Pour que le transformateur puisse transférer efficacement l'énergie électrique du circuit primaire au secondaire, il ne doit pas y avoir de pertes de lignes de champ magnétique. C'est pourquoi les bobinages sont généralement enroulés autour d'un noyau de matériau ferromagnétique, qui canalise et concentre le champ magnétique.



conduit le courant certes très bien, mais pas parfaitement. Aussi, pour éviter l'échauffement excessif des fils par effet Joule, il est nécessaire d'utiliser des fils d'autant plus épais que l'on souhaite y faire circuler un courant important. Les bobinages ne peuvent donc pas occuper la même position, ce qui contribue à l'encombrement...

CANALISER LE CHAMP ET AUGMENTER LA FRÉQUENCE

Autre conséquence de la séparation entre le bobinage primaire et le bobinage secondaire: ces deux circuits ne subissent pas le même champ magnétique. Les lignes du champ magnétique créé par le bobinage primaire ressemblent à celles d'un barreau aimanté; ces lignes sortent d'une extrémité du bobinage et reviennent à l'autre pour se refermer (voir l'encadré ci-dessus). Où que l'on place le bobinage secondaire, le champ magnétique auquel il sera soumis ne ressemblera pas à celui induit au niveau du >

Les transformateurs électriques sont le plus souvent des dispositifs assez encombrants...

Les auteurs ont récemment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



Soyons plus malins: faisons, pour le circuit secondaire, deux tours complets de fil au lieu d'un. Le champ électrique agit sur chacune des deux boucles ainsi formées et la tension dans le secondaire sera alors le double de celle du primaire. Nous avons réalisé notre premier transformateur!

Ce résultat se généralise, y compris lorsque le circuit primaire est alimenté par une tension alternative: le rapport

des tensions entre le circuit secondaire et le circuit primaire est égal au rapport des nombres de tours des bobinages correspondants.

Cela donne l'impression qu'il est aisé de manipuler les tensions... sauf que nous avons considéré des fils parfaitement conducteurs et parfaitement minces afin de les placer exactement au même endroit. Or les transformateurs sont souvent réalisés avec du cuivre, matériau qui

> bobinage primaire, ce qui réduira l'efficacité du dispositif.

Il existe heureusement une solution à cette difficulté: canaliser les lignes de champ en utilisant un matériau magnétique. Les plus répandus sont le fer doux ou la ferrite. Tous deux ont la propriété de s'aimanter fortement sous l'effet d'un champ magnétique, mais de perdre cette aimantation induite lorsque le champ s'annule. Ces matériaux usinés sous forme d'un tore ou d'un cadre, le noyau, se comportent alors comme des tuyaux à champ magnétique: enroulés autour d'un même noyau, les deux bobinages seront traversés par les mêmes champs magnétiques variables, ce qui induira donc les mêmes champs électriques, comme dans notre transformateur idéal, même s'ils sont éloignés.

SATURATION MAGNÉTIQUE

Pourquoi ne peut-on pas miniaturiser ce dispositif, notamment lorsqu'on n'a pas besoin de puissance importante et que l'on peut se contenter de fils fins? Parce qu'une seconde limite intervient: la saturation du matériau magnétique.

Le problème est le suivant. Si l'on veut réduire la taille du transformateur en conservant les mêmes caractéristiques électriques, une étude quantitative montre qu'il faut augmenter le nombre de spires lorsqu'on diminue le diamètre des bobinages. Cela se traduit notamment par une augmentation du champ magnétique dans le noyau.

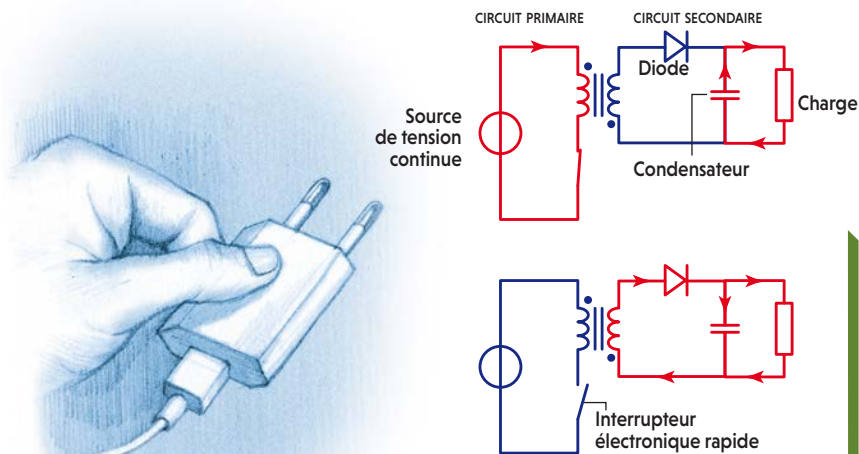
Or, à l'échelle microscopique, l'aimantation sous l'effet d'un champ magnétique est due à l'alignement progressif, sur la direction du champ, des aimants élémentaires constitués par certains électrons du matériau ou les boucles microscopiques de courant formées par les mouvements des électrons autour des atomes. Quand tous ces aimants sont alignés, le matériau atteint une aimantation maximale. Et si le champ augmente encore, le matériau ne peut alors plus canaliser davantage de lignes de champ: l'efficacité du transformateur décroît fortement.

Cela se comprend aussi d'un point de vue énergétique: soumis à une tension alternative, le matériau magnétique reçoit à chaque alternance l'énergie magnétique du premier bobinage, la stocke, puis la cède au second. La limite est ainsi donnée par la quantité d'énergie magnétique que le matériau peut stocker.

Le combat est-il perdu? Non! Puisqu'il y a une relation entre tension induite et variation du champ magnétique, au lieu d'augmenter le champ magnétique

CONVERTISSEUR FLYBACK

Les tout petits chargeurs de téléphones disponibles aujourd'hui intègrent un « convertisseur Flyback », un transformateur fonctionnant à très haute fréquence. Le circuit primaire, alimenté par une tension continue, est muni d'un interrupteur électronique qui s'ouvre et se ferme à haute cadence. Dans la phase où cet interrupteur est fermé, la tension appliquée entraîne l'augmentation progressive du courant (*symbolisé en rouge*) dans le circuit primaire. Le circuit secondaire est alors ouvert, car le courant induit est bloqué par une diode. Par conséquent, le champ magnétique augmente et le matériau magnétique accumule de l'énergie. Dans la seconde phase, l'interrupteur s'ouvre. Le courant s'annule (*en bleu*) dans le bobinage primaire et le secondaire prend le relais: le courant induit dans le secondaire circule dans le sens passant de la diode. Le matériau magnétique cède alors son énergie au circuit secondaire.



lorsque la taille du bobinage diminue, augmentons la cadence de ses variations.

C'est la solution adoptée dans de nombreux dispositifs modernes, par exemple dans le convertisseur Flyback qu'utilisent notamment les petits chargeurs de téléphones (*voir l'encadré ci-dessus*). La fréquence des grandeurs électriques qui traversent le transformateur est alors de plusieurs dizaines de kilohertz, au lieu des 50 hertz du secteur.

Dans ces dispositifs, la tension du secteur est au préalable redressée en tension continue. Cette dernière est appliquée au circuit primaire du transformateur comportant un interrupteur électronique qui s'ouvre et se ferme alternativement à un rythme très rapide. À chaque cycle, l'énergie transférée au circuit secondaire est donc au plus égale à l'énergie magnétique stockée à saturation dans le matériau magnétique comme auparavant, mais la limite du transfert d'énergie est ici déterminée par le temps de réponse du matériau magnétique à un champ magnétique alternatif (elle de l'ordre de quelques mégahertz). C'est l'un des obstacles à une miniaturisation plus poussée des transformateurs. ■

BIBLIOGRAPHIE

W. T. McLyman,
**Transformer and Inductor
Design Handbook**,
4^e édition, CRC Press, 2011.

P. M. Fishbane et al.,
**Physics for Scientists
and Engineers**, 3^e édition,
Pearson Prentice Hall, 2005.

E. Hecht, **Physique**,
De Boeck, 1999.